

陈秋会, 席运官, 王磊, 等. 产地环境中重金属和有机污染物对农产品质量的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 5-8.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.01.002

# 产地环境中重金属和有机污染物 对农产品质量的影响综述

陈秋会<sup>1</sup>, 席运官<sup>1</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 宗良纲<sup>2</sup>, 张怀志<sup>3</sup>, 徐爱国<sup>3</sup>, 肖兴基<sup>1</sup>

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042; 2. 南京农业大学资源与环境学院, 江苏南京 210095;

3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:**随着人们对农产品质量安全的日益重视, 农产品产地环境的安全性受到越来越多的消费者、生产者和管理者的高度关注。简要分析农产品产地污染物的主要来源, 重点阐述重金属和有机污染物等对农产品产量、营养品质和安全品质的影响, 分析表明, 农产品产地环境是影响农产品质量的重要因素, 产地环境质量的好坏直接决定农产品质量的高低, 为做好农产品产地环境的质量评估、保护及产地环境质量的改良提供参考。

**关键词:**产地环境; 农产品质量; 重金属; 有机污染物; 产量; 营养品质; 安全品质; 产地环境; 质量评估; 保护; 改良

**中图分类号:** X322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)01-0005-04

在现代农业发展进程中, 化肥、农药及农膜等农用化学品的大量使用使得农产品的种类和产量不断增加, 基本满足人们对量的需求, 但也引起了农产品产地环境污染的问题, 影响作物的营养品质和安全品质, 威胁人体健康<sup>[1]</sup>。近年来, 镉大米、蔬菜重金属超标、农残超标等众多农产品安全事件频发<sup>[2]</sup>, 农产品安全已成为时下最让人担忧的问题之一。随着生活水平的提高和食品安全意识的增强, 消费者越来越倾向于购买绿色、有机农产品, 且市场需求呈加速增长的态势。产地环境——土壤、水体和大气是从事农业生产的本源所在,

然而产地环境污染已成为制约我国绿色、有机农业发展的主要因素。“大气十条”“水十条”“土十条”的相继发布, 对改善我国农产品产地环境质量具有重要意义。本文对产地环境中重金属和有机污染物对农产品产量及品质影响的研究现状进行综合分析, 为保护和改良农产品产地环境质量, 发展绿色、有机农业, 保障农产品安全提供参考依据。

## 1 农产品产地污染物的来源

农产品产地环境系指影响农产品生长发育各种因素的总称, 是影响农产品质量安全的基础因素, 包括土壤、灌溉水、大气等环境要素。人类活动产生的污染物进入土壤、水体和大气并引起农产品赖以生长环境的恶化, 对农产品质量和人体健康产生危害的现象即为农产品产地环境污染。目前, 产地环境污染主要包括无机、有机及复合污染, 其中无机污染物以重金属为主, 如镉、砷、铬、铜、锌等; 有机污染物种类繁多, 既包括苯、甲苯、二甲苯等挥发性有机污染物, 又包括多环芳烃、多氯联苯等半挥发性有机污染物。

收稿日期: 2016-07-22

基金项目: 国家科技支撑计划(编号: 2014BAK19B01); 江苏省“333 工程”科研项目。

作者简介: 陈秋会(1982—), 女, 河南商丘人, 博士, 助理研究员, 主要从事有机农业与生态修复研究。E-mail: cqhofree@126.com。

通信作者: 席运官, 博士, 研究员, 主要从事有机农业和农村环保方面的研究。E-mail: xygofree@126.com。

[42] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田对稻田磷素径流损失的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(13): 5761-5763.

[43] 祖艳群, 杨静, 湛方栋, 等. 秸秆覆盖对玉米和青花农田土壤面源污染负荷的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 155-160.

[44] 王莉霞, 欧洋, 祝惠, 等. 一种降低稻田面源污染侧渗的生态田埂: CN201310373032.1[P]. 2013-11-27.

[45] 杨波, 梁正蓉. 坡地生物篱和缓坡地等高种植的水土保持效应[J]. 农技服务, 2010, 27(8): 997-998.

[46] 谢利芬, 刘庆生, 王卫民. 农田生态缓冲带的建设与研究[J]. 农业与技术, 2016, 36(9): 86-88.

[47] 王芝义. 休闲作物种植减少设施菜地土壤氮素淋洗及其机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.

[48] 李平. 果园生草技术及其在甘肃天水的市场前景[J]. 中国园艺文摘, 2010, 26(2): 142.

[49] 施卫明, 薛利红, 王建国, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——生态拦截技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1697-1704.

[50] Wu Y H, Kerr P G, Hu Z Y, et al. Eco-restoration; simultaneous nutrient removal from soil and water in a complex residential-cropland area[J]. Environmental Pollution, 2010, 118(7): 2472-2477.

[51] 江苏省苏州质量技术监督局. 农田径流氮磷生态拦截沟渠构建技术规范: DB3205/T 157-2008[S/OL]. (2009-03-01) [2016-07-01]. <http://wenku.baidu.com/view/ab8f4d87ec3a87c24028c481.html>.

[52] 杨文龙, 黄永泰, 杜娟. 前置库在滇池非点污染源控制中的应用研究[J]. 云南环境科学, 1996, 15(4): 8-10.

[53] 刘娅琴, 刘福兴, 宋祥甫, 等. 农村污染河道生态修复中浮游植物的群落特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 162-169.

### 1.1 产地环境中重金属的来源

据报道,我国受污染耕地已达 0.1 亿  $\text{hm}^2$ ,占 1.2 亿  $\text{hm}^2$  耕地的 8.3%,其中大部分为重金属污染<sup>[3-4]</sup>。化肥/有机肥的施用是产地环境重金属的最直接来源。我国耕地面积不足全世界的一成,却使用了全世界近 40% 的化肥。据调查,我国近 20 个磷肥(过磷酸钙)样品中的锌、镍、铜、铬、钴平均含量分别为 298.0、16.9、31.1、18.4、2.0  $\text{mg/kg}$ <sup>[5]</sup>。我国每年通过施用有机肥进入农田的镉、砷、铬分别达 778、1 412、6 113 t,三者分别占进入农田总量的 54.9%、23.8%、35.8%。施用猪粪 17 年后稻田土壤的有效铜、锌、镉含量分别较施化肥处理增加 335.9%、320.8%、421.4%<sup>[3]</sup>。因此,有机肥的安全性或许会成为化肥零增长的“拦路虎”。

工矿企业排放的烟尘和城市大气中的重金属等通过大气运输,经干湿沉降进入农田土壤<sup>[6]</sup>。研究表明,空气中 80%~90% 的铅来源于使用含铅汽油的机动车排放<sup>[7]</sup>。陈培飞等的研究显示,天津市大气中的 Zn、Pb、Cu 和 Cr 等重金属在细颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  中明显富集<sup>[8]</sup>。煤和石油燃烧后 10%~30% 的含重金属烟尘沉降在距排放源十几千米的范围内<sup>[9]</sup>。全国约有 1.2 万座尾矿库,矿山开采产生的尾矿、矿渣堆放严重污染周边水体和土壤环境。我国西南和中南地区的有色金属矿产资源丰富,镉等重金属元素背景值高,是农产品重金属超标的主要原因之一。2013 年国务院文件首次公开提出农业生产禁止使用污水,这有利于农田灌溉水质的控制和土壤污染的治理。

### 1.2 产地环境中有机污染物的来源

农药过量或不合理使用导致有机氯/有机磷在土壤中大量残留,甚至可转化为更毒或致癌的持久性有机污染物多氯联苯、多环芳烃等。被世界卫生组织确定为强致癌物质的苯、甲苯、二甲苯等苯系物被广泛应用于生产除草剂类农药<sup>[10]</sup>。虽然我国已明令禁止使用甲胺磷、对硫磷等剧毒、高残农药,但是新品种农药不断涌现,且在实际中使用禁用农药的现象仍然存在,农产品中农残超标现象普遍,农药中毒事件时有发生。据悉,我国单位面积的农药使用量是世界平均水平的 2.5 倍。我国西北干旱地区农膜污染问题比较突出,农膜使用量从 1991 年的 31.9 万 t 增加到 2015 年的 200 多万 t。农膜污染是由于它是难降解的有机化合物,即持久性有机污染物,残留土壤或被烧掉产生的二噁英等都会污染环境,每年农膜回收率不足 2/3。生物质焚烧、燃煤和焦化企业多环芳烃的排放比例分别为 60%、20% 和 16%<sup>[11]</sup>,其中京津冀周围地区的草、木材和煤炭等燃烧对多环芳烃的贡献占绝大部分<sup>[12]</sup>。汽车尾气排放及石油类产品等也是多环芳烃、苯系物等有机污染物的来源<sup>[12-14]</sup>。

## 2 产地污染物对农产品的影响

### 2.1 重金属对农产品的影响

全国首次土壤污染状况调查结果显示,19.4% 的耕地土壤点位重金属超标。土壤中的重金属具有富集性、生物累积性、不可逆性等特点,不能或不易被分解转化,可通过食物链逐级浓缩放大对生物产生毒性效应,重金属的食物链污染直接威胁人体健康。可对植物产生危害且毒性最强的重金属有汞、镉、铜、铅、铬和类金属砷,在食物链上易对人体健康产生

危害的元素主要有汞、镉、砷、铅等 4 种。作物受重金属污染的程度主要反映在作物的产量、品质和重金属含量等方面。

**2.1.1 重金属对农产品生物学特性的影响** 重金属对同一种植物的作用效果多呈现“低促高抑”现象。重金属超标会扰乱作物体内的各种生理生化过程,可与植物中的蛋白质结合,妨碍作物对氮、磷、钾等矿质元素的正常吸收,导致作物生长缓慢,从而影响作物的产量<sup>[15]</sup>。重金属镉主要累积在 0~20 cm 的表层土壤中,镉胁迫抑制韭菜等种子萌发,且可使韭菜的发芽指数和活力指数随镉浓度的增加而下降<sup>[16]</sup>;在重金属镉的胁迫下,水稻、小米、小麦的根长、根系干物质量、根系总数、根系表面积和体积、根系活力明显受到抑制<sup>[17-20]</sup>,叶片叶绿素、蛋白质含量下降,丙二醛含量和细胞膜透性增加<sup>[21]</sup>,水稻、花生的株高、穗长、有效穗数、结实率、千粒质量和产量有所下降<sup>[17-18]</sup>,严重者可导致根系发黑,地上茎叶枯萎,作物死亡。镉胁迫可使常规水稻黄华占和武运梗 27 的减产量分别高达 62.1% 和 39.9%<sup>[17]</sup>。当铬的浓度为 10  $\mu\text{mol/L}$  时可明显抑制玉米根部生长,为 100  $\mu\text{mol/L}$  时幼苗停止生长,含水量明显下降,冠根比增大,受到严重的氧化胁迫<sup>[22]</sup>。当铅浓度为 125  $\text{mg/kg}$ 、锌浓度为 80  $\text{mg/kg}$  时,可对玉米叶片叶绿素、芽、根、株高和干鲜质量产生影响<sup>[23]</sup>。

**2.1.2 重金属对农产品营养品质的影响** 研究表明,重金属对作物粗蛋白、还原糖、淀粉、脂肪、氨基酸等营养指标有较大影响<sup>[24]</sup>,可降低作物品质。高磷水灌溉抑制作物对硒、镍和锌等有益元素的摄入,会降低作物的营养价值<sup>[25]</sup>。铜过量使得甘蔗的出汁率、还原糖含量增加,纤维含量降低,产糖量下降<sup>[26]</sup>。随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米垩白米率、粗蛋白含量呈增加趋势,而直链淀粉含量则呈降低趋势,土壤中的锌、铬对水稻籽粒中铬含量产生协同效应<sup>[27]</sup>。镉可使糙米中粗蛋白、粗淀粉、赖氨酸、直链淀粉等的含量显著减少,降低糙米的营养价值<sup>[28]</sup>,也可使小麦籽粒中的支链淀粉含量下降<sup>[29]</sup>。镉胁迫降低了花生籽仁中的脂肪含量,增加其亚油酸含量,降低硬脂酸和油酸含量以及油酸与亚油酸的比值,导致花生制品货架寿命变短<sup>[18]</sup>。

**2.1.3 重金属对农产品安全品质的影响** 产地环境中的重金属含量关系到农产品中的重金属含量。研究发现,土壤中的重金属含量和植物地上部、稻米、小麦籽粒、蔬菜中的重金属含量具有显著的线性相关关系<sup>[30-31]</sup>。有研究指出,蔬菜、小麦各器官中的铅主要来自于根从土壤中吸收的有效铅,表明经根系从土壤中吸收铅是作物铅积累的主要方式<sup>[32-33]</sup>。与其他重金属相比,土壤镉很容易迁移到蔬菜可食用部分和谷物籽粒中<sup>[34]</sup>,这主要是由于土壤中的镉活性高、移动性强,尤其当土壤 pH 值低于 5.5 时,土壤中镉的植物有效性提高,并且土壤镉浓度在达到毒害植物之前就可以使植物的可食用部分镉含量超过食用标准而危害人类健康<sup>[35]</sup>,此时应严格限制外源镉进入土壤。在大气污染较重的地区,叶片对重金属的吸收不可忽视。据不完全估计,大气重金属污染对城郊蔬菜的重金属污染百分率可高达 10%<sup>[36]</sup>。利用盆栽对比试验和铅同位素研究高速公路路边水稻中的重金属来源,结果表明,稻米中 41% 的镉和 46% 的铅来自叶片对大气的吸收,表明高速公路两旁的作物生产布局须要考虑农产品的安全<sup>[37]</sup>。

不同重金属在作物体内富集的部位有所差异。在重金属

胁迫条件下,玉米、水稻、油菜、花生、小麦体内铅、镉、铬含量的分布表现为根>茎(秸秆)>叶>籽粒<sup>[18,23,38-41]</sup>,玉米根系的铬含量是茎部的4~20倍<sup>[42]</sup>。玉米各器官中锌的富集量高低顺序为叶>籽粒>根>秸秆<sup>[23]</sup>。甘蔗中铜的积累能力表现为根>茎>叶>梢头,且随外源铜浓度的增加而增加,呈显著的正相关关系<sup>[26]</sup>。作物的品种差异使得其对重金属的积累能力和转运能力存在显著差异。在镉胁迫下杂交稻的籽粒部位表现出优于常规稻的镉低累积特性<sup>[17]</sup>。植株体内较低的镉迁移系数是引起小麦洛优9909籽粒中镉含量低于新麦9817的主要原因<sup>[20]</sup>。孙洪欣等指出,由于玉米先玉335体内的重金属迁移能力较弱,籽实中镉、铅含量显著低于其他品种,适宜在华北地区镉、铅轻度污染区推广种植<sup>[42]</sup>。因此,筛选和培育重金属低积累农作物品种是保证农产品安全生产的有效途径之一。

## 2.2 有机污染物对农产品的影响

有机污染物主要通过根部吸收或通过大气沉降 to 植物叶表面扩散进入植物体内,其中分子量、疏水性较强的有机污染物通过根部被吸收,几乎所有的非离子型有机污染物都是在蒸腾拉力的作用下被动吸收进入植物体内的,只有极少数有机污染物如苯氧基型除草剂可被植株主动吸收<sup>[43]</sup>。

有机污染物可抑制农作物的生长发育及其对矿质营养的吸收利用,降低农产品产量和品质,通过生物富集和放大作用,最终危及人体健康。研究表明,有机污染物(邻苯二甲酸酯、表面活性剂等)可导致菠菜出苗率低,植株矮小;花椰菜叶片卷曲,结球迟,成球少;萝卜、黄瓜根系老化,萝卜减产12.8%~60.0%<sup>[44-45]</sup>。另外,邻苯二甲酸酯可通过干扰类胡萝卜素合成而致使叶绿素功能发生障碍,最终导致青花菜和菠菜可食用部位的维生素C含量有所下降<sup>[46]</sup>;表面活性剂可明显降低小麦体内的氨基酸含量<sup>[45]</sup>,促进植物对重金属和农药的吸收富集<sup>[47-48]</sup>,降低作物的营养品质和安全品质。石油烃浓度较高时会在植物根系上形成1层黏膜,阻碍根系对营养元素的吸收及其呼吸功能,甚至引起根系腐烂,且有毒物质进入植物体内可产生一定的毒害作用,抑制植物生长<sup>[49]</sup>。研究表明,土壤中的高石油烃含量导致大豆生长受到明显抑制,出苗率、产量、籽粒品质明显下降<sup>[50]</sup>。挥发性有机污染物苯系物可导致植物叶片光合系统受到损害,叶绿素、可溶性糖含量降低<sup>[51]</sup>,抑制小麦根和芽的伸长<sup>[52]</sup>。由于苯并(a)芘的疏水性,根部只限于接触吸收(或吸附)而难以通过根部组织向地上部运输<sup>[53]</sup>,水稻、小麦籽实中的苯并(a)芘主要来自大气污染,土壤和水是次要的<sup>[54-55]</sup>,因此应重点关注大气中的苯并(a)芘。

农药的大量使用引发越来越多食品安全问题的最直接原因是农产品的农药残留严重超标。农药会直接附着或渗入作物内部,海南毒豇豆中甲胺磷、水胺硫磷等农药残留量严重超标。据报道,我国农药的有效利用率约为30%~40%,而真正作用于靶标生物的不超过1%,大部分农药扩散到周围土壤、空气或水体中,污染农产品产地环境<sup>[1]</sup>。土壤中的残留农药不仅可导致下茬作物种子根尖、芽梢等部位变褐或腐烂,降低出苗率<sup>[56]</sup>,且可通过作物根系吸收在农产品内富集<sup>[57-58]</sup>,导致作物农残污染,引发食品安全事件。

## 3 结语

土壤、水体和大气等环境因素是农作物赖以生存/生长的基础,产地环境中的重金属、有机污染物等的存在可抑制作物的生长,降低农产品的产量、营养品质和安全品质,从而威胁人体健康。因此,须加强对大气、水体、土壤污染物(重金属、农药等)与作物相互关系的研究,以及污染物在土壤—作物—人体中的迁移、转化和积累规律,构建农产品产地环境安全评价指标体系,进一步提高农产品产地环境质量的科学性和实用性,为优化和控制产地环境质量、提高我国农产品质量提供技术支撑。同时,对于绿色、有机农产品的生产,既要制定完善和严格的绿色、有机农产品产地环境质量标准,又要重视对产地环境的监测和评估,开展区域适宜性划分,选择符合产地环境质量标准的区域进行生产,这不仅可从源头确保农产品生产规范和产品安全优质,使消费者放心消费认证的绿色、有机产品,促进我国农业产业的可持续发展,而且有利于绿色、有机农产品生产示范基地的创建和发展规划,保障我国绿色、有机农业的合理发展。

## 参考文献:

- [1] 潘攀,杨俊诚,邓仕槐,等. 土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2389-2398.
- [2] 梁尧,李刚,仇建飞,等. 土壤重金属污染对农产品质量安全的影响及其防治措施[J]. 农产品质量与安全, 2013(3): 9-14.
- [3] 李本银,黄绍敏,张玉亭,等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 129-135.
- [4] 王付民,陈杖榴,孙永学,等. 有机肿饲料添加剂对猪场周围及农田环境污染的调查研究[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 154-162.
- [5] 张琼,万雷. 重金属镉对农产品的污染与安全标准[J]. 现代农业, 2012(6): 84-86.
- [6] 鲁荔,杨金燕,田丽燕,等. 大邑铅锌矿区土壤和蔬菜重金属污染现状及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3): 374-380.
- [7] 刘英对,王峰. 珠江三角洲主要城市郊区公路两侧土壤和蔬菜中铅含量初探[J]. 仲恺农业技术学院学报, 1999, 12(4): 51-54.
- [8] 陈培飞,张嘉琪,毕晓辉,等. 天津市环境空气PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>中典型重金属污染特征与来源研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2013, 46(6): 1-7.
- [9] 杨景辉. 土壤污染与防治[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [10] 谭冰,王铁宇,李奇峰,等. 农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2272-2280.
- [11] Xu S S, Liu W X, Tao S. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons in China[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(3): 702-708.
- [12] 曹云者,柳晓娟,谢云峰,等. 我国主要地区表层土壤中多环芳烃组成及含量特征分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 197-203.
- [13] 张枝焕,卢另,贺光秀,等. 北京地区表层土壤中多环芳烃的分布特征及污染源分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 668-675.

- [14] 傅晓钦,翁燕波,钱飞中,等. 行驶机动车尾气排放 VOCs 成分谱及苯系物排放特征[J]. 环境科学学报,2008,28(6):1056-1062.
- [15] 黄奎付,邱险辉. 重金属铅对农产品的污染与安全标准[J]. 科协论坛(下半月),2013(4):138-139.
- [16] 徐玲玲,李巧玉,张红莲,等. 3种草本植物种子萌发及幼苗初期对镉胁迫的生理响应[J]. 种子,2016,35(3):37-41.
- [17] 邓刚,王刚,孙梦飞,等. 镉胁迫下不同水稻品种镉的累积与分布差异[J]. 浙江农业科学,2016,57(4):468-471.
- [18] 高芳,林英杰,张佳蕾,等. 镉胁迫对花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 作物学报,2011,37(12):2269-2276.
- [19] 田保华,张彦洁,张丽萍,等. 镉/铬胁迫对谷子幼苗生长和 NADPH 氧化酶及抗氧化酶体系的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(2):240-246.
- [20] 肖亚涛,吴海卿,李中阳,等. 不同基因型冬小麦镉累积差异及其与根系形态的关系[J]. 水土保持学报,2015,29(6):276-280,286.
- [21] 张云芳,陈楚,陈晨,等. 镉胁迫对青菜幼苗某些生理特性以及基因组多态性的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(3):432-439.
- [22] 黄辉,高峡,王娟. 六价铬对玉米幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(4):633-638.
- [23] 孙雪萍,林琳,张雪萍. 不同浓度铅、锌对玉米生长的生态毒理学效应研究[J]. 国土与自然资源研究,2013(1):57-60.
- [24] 米艳华. 青花菜对重金属铅、镉吸收与积累特性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [25] 佟俊婷. 内蒙古河套平原高砷水灌溉对土壤-作物系统中砷分布的影响及健康效应[D]. 北京:中国地质大学,2014.
- [26] 郭家文,崔雄维,张跃彬,等. 重金属铜在甘蔗体内的吸收及对甘蔗产量和品质的影响[J]. 土壤,2010,42(4):606-610.
- [27] 朱雪梅,邵继荣,林立金,等. 锌铬复合污染对稻米品质的影响[J]. 农业环境科学学报,2008,27(6):2297-2302.
- [28] 郑文娟,邓波儿. 铬和镉对作物品质的影响[J]. 土壤,1993,25(6):324-326.
- [29] 郭天财,夏来坤,朱云集,等. 铜、镉胁迫对冬小麦籽粒淀粉含量和糊化特性影响的初步研究[J]. 麦类作物学报,2006,26(3):107-110.
- [30] 王爽,李荣华,张增强,等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学,2014,34(9):2313-2320.
- [31] 徐友宁,张江华,刘瑞平,等. 金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J]. 中国地质,2007,34(4):716-722.
- [32] 刘玉萃,李保华,吴明作. 大气-土壤-小麦生态系统中铅的分布和迁移规律研究[J]. 生态学报,1997,17(4):418-425.
- [33] 魏秀国,何江华,王少毅,等. 城郊公路两侧土壤和蔬菜中铅含量及分布规律[J]. 农业环境与发展,2002,19(1):39-40.
- [34] Guo Y B, Feng H, Chen C, et al. Heavy metal concentrations in soil and agricultural products near an industrial district[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2013, 22(5):1357-1362.
- [35] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients - food safety issues[J]. Field Crops Research, 1999, 60(1/2):143-163.
- [36] 杨肖娥,余剑东,倪吾钟,等. 农业环境质量与农产品安全[J]. 中国农业科技导报,2002,4(4):3-9.
- [37] 冯金飞. 高速公路沿线农田土壤和作物的重金属污染特征及规律[D]. 南京:南京农业大学,2010.
- [38] 郑宏艳,刘书田,米长虹,等. 土壤-水稻籽粒系统富集主要影响因素统计分析[J]. 农业环境科学学报,2015,34(10):1880-1888.
- [39] 武琳霞,丁小霞,李培武,等. 我国油菜镉污染及菜籽油质量安全性评估[J]. 农产品质量与安全,2016(1):41-46.
- [40] 郑宏艳,姚秀荣,侯彦林,等. 中国土壤模式-作物系统重金属生物富集模型建立[J]. 农业环境科学学报,2015,34(2):257-265.
- [41] 张晓薇,刘博. 铬对农作物生长的影响[J]. 环境科技,2010,23(2):48-51.
- [42] 孙洪欣,赵全利,薛培英,等. 不同夏玉米品种对镉、铅积累与转运的差异性田间研究[J]. 生态环境学报,2015,24(12):2068-2074.
- [43] 林祺祺,蔡信德,王诗忠,等. 植物吸收、迁移和代谢有机污染物的机理及影响因素[J]. 农业环境科学学报,2013,32(4):661-667.
- [44] 曾巧云,莫测辉,蔡全英,等. 萝卜对邻苯二甲酸酯(PAEs)吸收累积特征及途径的初步研究[J]. 环境科学学报,2006,26(1):10-16.
- [45] 黄士忠,陈国光,王德荣,等. 合成洗涤剂(LAS)对农作物影响的研究[J]. 农业环境科学学报,1994,13(2):58-62.
- [46] 蔡全英,莫测辉,李云辉,等. 广州、深圳地区蔬菜生产基地土壤中邻苯二甲酸酯(PAEs)研究[J]. 生态学报,2005,25(2):283-288.
- [47] Mata-Sandoval J C, Karns J, Torrents A. Influence of rhamnolipids and triton X-100 on the biodegradation of three pesticides in aqueous phase and soil slurries[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(7):3296-3303.
- [48] 龚宁. 表面活性剂对蔬菜生长及食用安全的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [49] 许端平,王波. 土壤中石油烃类污染物对高粱玉米生长的影响研究[J]. 矿业快报,2006,25(12):28-30.
- [50] 李春荣,王文科,曹玉清. 石油污染土壤对黄豆生长的影响[J]. 安全与环境学报,2007,7(4):28-30.
- [51] 鲁敏,景荣荣,赵洁,等. 苯污染胁迫下室内植物叶绿素含量变化分析研究[J]. 山东建筑大学学报,2016,31(1):1-6.
- [52] 刘尧,周启星,谢秀杰,等. 土壤甲苯、乙苯和二甲苯对蚯蚓及小麦的毒性效应[J]. 中国环境科学,2010,30(11):1501-1507.
- [53] 孙清,陆秀君,梁成华. 土壤的石油污染研究进展[J]. 沈阳农业大学学报,2002,33(5):390-393.
- [54] 高拯民,吴维中,谢重阁,等. 致癌物苯并(a)芘对土壤-植物系统污染研究[J]. 环境科学学报,1981,1(1):12-30.
- [55] 王冰妍,蒲海平,薛亚楼. 粮食蔬菜与土壤和大气中苯并(a)芘含量的相关性研究[J]. 环境保护与循环经济,2009,29(6):34-36.
- [56] 余露. 蔬菜农药药害类型及防治方法[J]. 农药市场信息,2009(2):45.
- [57] 徐皓,秦公伟,王哲. GC-MS/MS法分析不同产地延胡索中有机氯、拟除虫菊酯农药残留[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):355-358.
- [58] 林祥群,卢春霞,罗小玲,等. 气相色谱-质谱法测定枸杞中28种农药残留[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):285-289.